DOI:10.11931/guihaia.gxzw201803001

鼎湖山针阔叶混交林凋落物CO_2释放对模拟酸雨的响应

梁国华[1]，张德强[2]，卢雨宏[3]，冯霞[3]，罗国良[3]，刘展宏[3]，赵则海[1*]

(1. 肇庆学院，广东 肇庆 526061；2. 中国科学院华南植物园，广东 广州 510650；3. 广东环境保护工程职业学院，广东 佛山 528216)

摘要：研究酸雨增加对森林凋落物 CO_2 释放的影响对理解森林生态系统碳循环如何应环境变化具有重要意义。2011 年 1 月开始在鼎湖山针阔叶混交林(混交林)进行模拟酸雨实验，设置 4 个不同处理水平，即对照 CK(pH=4.5 左右的天然湖水)、T1(pH=4.0)、T2(pH=3.25)和 T3(pH=2.5)。2013 年 1 月–2013 年 12 月对不同酸雨强度处理下的森林凋落物 CO_2 释放速率进行为期 1 年的连续观测，试图探讨酸雨对混交林凋落物 C 排放的影响。结果显示：凋落物 CO_2 释放年通量在对照样方为(1507.41±155.19) $gCO_2·m^{-2}·a^{-1}$，其中湿季和旱季分别占年通量的 68.7%和 31.3%。模拟酸雨抑制了森林凋落物 CO_2 释放，表现为：与 CK 相比，T2 和 T3 处理下的 CO_2 释放年通量分别显著降低 15.4%和 42.7%($P<0.05$)；且这种抑制作用具有季节差异性，处理间的显著差异只出现在湿季。凋落物 CO_2 释放速率与土壤温度和土壤湿度分别呈显著指数相关和显著直线相关，同时，酸雨处理降低了凋落物 CO_2 释放的温度敏感性。混交林凋落物 CO_2 释放在模拟酸雨下的抑制效应与土壤累积酸化而导致的土壤微生物活性变化有关，表现为：模拟酸雨作用下土壤 pH 值和微生物量碳显著下降。该文结果量化了酸雨对混交林凋落物 CO_2 释放通量的影响程度，证明酸雨是影响混交林土壤碳循环的重要因子之一。

关键词：模拟酸雨，凋落物 CO_2 释放，针阔叶混交林，鼎湖山

Responses of litter CO_2 emission to simulated acid rain in a mixed conifer and broadleaf forest at Dinghushan Nature Reserve

LIANG Guo-hua[1], ZHANG De-qiang[2], LU Yu-hong[3], FENG Xia[3], LUO Guo-liang[3], LIU Zhan-hong[3], ZHAO Ze-hai[1*]

(1. *Zhaoqing University*, Zhaoqing 526061, Guangdong, China; 2. *South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences*, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 3. *Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering*, Foshan 528216, Guangdong, China)

Abstract: Litter is a key factor controlling soil carbon sequestration in forest ecosystem as well as a very important part of soil respiration. Our objective of this study was to determine the effects of elevated acid rain on litter CO_2 emission in forests of southern China. Therefore, a field experiment of simulated acid rain (SAR) was conducted in a mixed conifer and broadleaf forest (MF) at Dinghushan Nature Reserve. SAR treatments included CK(the local lake water, pH 4.5),

基金项目：国家自然科学基金(31500353)、广东省科技计划项目(2014A020216031)和广东大学生科技创新培育专项资金项目(粤财政[2017]83 号)[Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC 31500353); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China (No. 2014A020216031); Special fund project for scientific and technological innovation cultivation of college students of Guangdong ([2017]83)]。

作者简介：梁国华（1985-），男，博士，主要从事森林生态学研究， (E-mail) nj-monitor@163.com。

***通信作者：**赵则海，博士，教授，主要从事植物生态学研究，(E-mail) zhzh315@sina.com。

T1(pH 4.0), T2(pH 3.25), and T3(pH 2.5) with four replicates. SAR experiments were initiated in January 2011, and the litter CO_2 emission rate under SAR was measured twice a month over one year from January 2013 to December 2013. Results indicated that litter CO_2 emission followed a clear seasonal pattern in the forest during the study period, with significantly higher rates in the wet season and lower rates in the dry one (P<0.05). The mean annual litter CO_2 efflux in the CK plots was (1507.41±155.19) $gCO_2·m^{-2}·a^{-1}$, to which the wet season and the dry season contributed 68.74% and 31.26%, respectively. SAR significantly reduced litter CO_2 emission in the forest (P<0.05). Compared with CK, mean annual litter CO_2 efflux was 15.4% and 42.7% lower in T2 and T3 treatments, respectively. These negative effects were evident in the wet season (P<0.05), but not in the dry one. In all treatments, litter CO_2 emission exhibited significantly positive exponential relationships with soil temperature (P<0.01, with R^2 ranging from 0.35 to 0.49) and significantly positive linear relationships with soil moisture (P<0.01, with R^2 ranging from 0.25 to 0.45). In addition, the mean temperature sensitivity (Q_{10}) values showed a declining trend with the increasing level of SAR**.** The depression of litter CO_2 emission after SAR in the MF was related to the aggravation of soil acidification and the depression of microbial activity, as we found that soil pH value and soil microbial biomass C significantly decreased under SAR. The restrained effects of SAR on microbial activity and then on litter CO_2 emission had been strengthened over time with significant differences among treatments only occurring in the later stage of the study period. In conclusion, our results quantified the effect of SAR on litter CO_2 efflux, and supported an important role of acid rain in regulating soil carbon cycle.

Keywords: simulated acid rain, litter CO_2 emission, mixed conifer and broadleaf forest, Dinghushan Nature Reserve

酸雨(Acid rain)又称酸沉降(Acid precipitation)，其定义为 pH 值小于 5.6 的大气降水的总称(马元丹等，2010)。众所周知，我国南方是继欧洲和北美以外的世界第三大酸雨区，而且是唯一一个面积还在扩大的区域(王文兴和许鹏举，1997)。监测数据表明，该区域许多城市的酸雨频率已达 80%(杨宗慧，2002)，同时，降水 pH 值<4.5 的情况也大面积出现(Cao et al，2009)。而且，我国的酸雨分布区与酸性土壤的分布区重合，导致酸雨区土壤酸化问题在过去几十年间也日益严重(Dai et al，1998)。森林是陆地生态系统的主体，酸雨和土壤酸化问题对森林结构和功能的的危害及森林衰退等问题也一直备受关注(Ulrich & Walter，1992；Busch et al，2001)。

凋落物是森林生态系统物质循环的重要环节(樊后保等，2008)，同时也是森林土壤呼吸的重要碳源，如 Raich 和 Schlesinger (1992)曾估算，地表凋落物和土壤有机质分解贡献了全球土壤 CO_2 排放通量的 74%。可见，深入研究凋落物对了解森林土壤碳库循环以及土壤呼吸的源汇问题具有重要意义。目前国内外研究者主要采用凋落物去除和添加的方式来研究凋落物是如何影响土壤呼吸，进而影响有机质和养分的积累和动态(Vasconcelos et al，2004；Amazonian et al，2007；Zimmermann et al，2009)。而关于森林凋落物分解速率对环境变化的响应业已受到国内外学者的普遍关注(林波等，2002；孙志高等，2008)，然而，相对与氮沉降和温度增加等环境因子变化(李化山等，2014；Yao et a1，2018；陈玥希等，2017)，凋落物分解过程对酸雨增加的响应方面研究较为少见(马元丹等，2010)，且大多数学者仅以凋落物分解速率这单一指标评估酸雨对凋落物分解的影响(洪江华等，2009；梁国华等，2014)。目前为止，鲜有研究对酸雨作用下凋落物释放 CO_2 通量进行量化，因此限制了酸雨对森林生态系统碳循环影响的准确估算。

另外，由于人类活动的影响，中国热带和亚热带区域地带性森林受到广泛破坏，而由人

工种植的马尾松(*Pinus massoniana*)针叶林由于阔叶树种的自然入侵而自然演替形成的马尾松针阔叶混交林是该区域的主要森林类型(Mo et al，2003)。如混交林是目前鼎湖山自然保护区内分布面积最大的植被类型(Mo et al，2003)，其凋落物产量和现存量分别达(8.50±0.62) t·hm^{-2} 和(4.97±1.03) t·hm^{-2}，是该林型土壤呼吸极为重要的来源(邓琦等，2007)。而近年来，鼎湖山自然保护区林酸雨增加和土壤酸化问题突出(朱圣洁等，2011；刘菊秀等，2003)，但至今为止，仍没有相关研究量化酸雨对混交林凋落物 CO_2 释放通量的影响。鉴于此，本研究以鼎湖山混交林为研究对象，动态监测模拟酸雨处理下凋落物 CO_2 释放速率及其相关环境因子，量化酸雨对地凋落物 C 排放的影响程度，为森林生态系统碳平衡的准确评估及模型的建立提供数据支持。

1　材料与方法

1.1　研究区域与样地概况

研究地设在广东省肇庆市鼎湖山自然保护区，东经 112°30′39″–112°33′41″，北纬 23°09′21″–23°11′30″(梁国华等，2014)。该地区气候季节交替明显，属亚热带季风性气候型(Liang et al，2013)。年平均气温为 20. 9 ℃，最冷月是 1 月，平均温度为 12.6 ℃，最热月是 7 月，平均温度为 28.0 ℃；年均降雨量为 1929 mm，其中 4–9 月的降雨量约占全年的 80%，为湿季，10 月–次年 3 月为旱季(黄展帆和范征广，1982)。鼎湖山自然保护区具有三种典型的亚热带植被类型，即马尾松针叶林、针阔混交林和季风常绿阔叶林(梁国华等，2016a)。本实验样地设置在混交林，其多分布于海拔 80–400 m 之间，林龄约 100 年，优势树种有锥栗(*Castanopsis chinensis*)、荷木(*Schima superba*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)和马尾松等(梁国华等，2016a)。混交林土壤为赤红壤, 土层厚度 40–70 cm(熊鑫等，2016)。本研究样地设置前进行的土壤本底调查显示，0–10 cm 土壤有机碳、总氮、碳氮比、有效态氮分别为：(3.8±0.1)、(37.8±6.4)mg·g^{-1}、(2.6±0.9) mg·g^{-1}、14.5 和(13.5±5.7) mg·kg^{-1}。

1.2　试验样地设计

2011 年 1 月在上述混交林设置 16 个 1.7 m×1.7 m 的样方用于模拟酸雨实验。为了避免样方之间土壤和植物根系的相互干扰，每个样方之间设置 2 m 宽的缓冲带，并采用塑料板材把每个样方四周围起，塑料板材插入地表以下 15 cm，地上部分高出地表 10 cm。酸雨处理的设计依据可参考(Liang et a1，2013)，共有四个梯度的模拟酸雨处理，分别为 CK(当地的天然湖水，pH 值约为 4.5)、T1(pH 值为 4.0)、T2(pH 值为 3.25)和 T3(pH 值为 2.5)，而模拟酸雨的 H_2SO_4：HNO_3 为 1：1。每个处理设 4 个重复，处理和样方设计为完全随机。模拟酸雨处理于 2011 年 3 月份开始，每月 2 次，采用汽油动力喷雾机人工喷淋。每个样方每次接受的模拟酸雨量为 10 升。四个处理的每个样方内设置两个直径为 20 cm 的土壤呼吸环，位置随机，土壤呼吸环插入土壤 5 cm(梁国华等，2016b)。两环中，一个正常允许凋落物进入；另外一个参考王光军等(2009a)进行去除凋落物处理，即在其上方放置大小为 0.5 m×0.5 m 的凋落物收集网，以防止凋落物落入土壤呼吸环。收集网网格大小为 1 mm×1 mm，离地面的高度设置为 0.5 m。

1.3　凋落物 CO_2 释放速率的测定

CO_2释放速率采用 Li-8100土壤呼吸测定仪(Li-Cor Inc，NE，USA)测定。于2013年1月–2013年12月，即模拟酸雨处理22个月到33个月后这一年周期内，每月测定2次，在每次模拟酸雨前进行，每次测定时间为上午9：00–12：00，因为该时间段测定值最能反映每天的平均速率(Tang et al，2006)。与CO_2释放速率测定同步，利用Li-8100自身配带的温度和湿度探针测定5 cm深土壤的土壤温度和0-5 cm的土壤湿度。每个样方的凋落物CO_2释放速率为保留凋落物与去除凋落物两个PVC环测得的CO_2释放速率数值之差。

1.4　土壤pH值、土壤微生物量碳和土壤有机碳的测定

实验期间内，共对样地进行了两次的土壤样品采集，采集时间分别为2011年6月和2013年6月(模拟酸雨3个月和27个月后)。在每个样方内随机选取三个点，采集0–10 cm层次土壤，混合后装入布袋，带回实验室过2 mm筛。过筛后的新鲜土壤一部分采用氯仿熏蒸-提取法测定土壤微生物量碳(梁国华等，2016a)；另一部分新鲜土壤自然风干后用作土壤pH值和土壤有机碳的测定，土壤pH值采用氯化钾浸提法测定，土壤有机碳则采用重铬酸钾-外加热法测定(梁国华等，2014)。

1.5　数据的分析

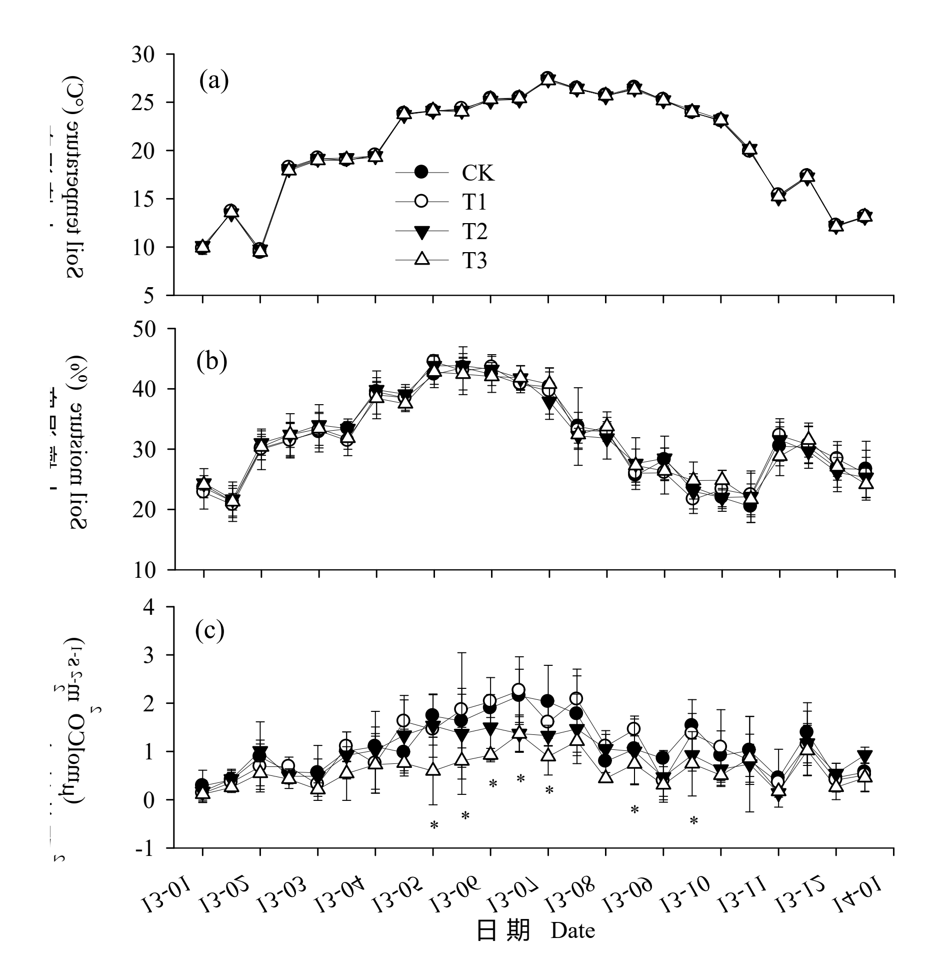
所有数据均利用SPSS 11.0进行统计分析，用SigmaPlot 10.0作图。用Repeated measured ANOVA进检验实验期间凋落物CO_2释放速率在处理间的差异显著性；而不同模拟酸雨处理间凋落物CO_2释放通量、土壤pH值、土壤微生物量碳和土壤有机碳的差异显著性则利用One-Way ANOVA检验。凋落物CO_2释放速率与温度之间关系采用如下指数模型：$y=ae^{bT}$ 式中，y为凋落物CO_2释放速率；T为土壤温度；a是温度为0 ℃时凋落物CO_2释放速率；b为温度反应系数(王光军等，2009b)。Q_{10}值(即土壤温度每升高10 ℃，凋落物CO_2释放速率变为未增温前释放速率的倍数)通过下式确定：$Q_{10}=e^{10b}$，式中，b同上式(梁国华等，2016b)。

2　结果与分析

2.1　模拟酸雨下凋落物CO_2释放的动态及其与土壤温湿度的关系

凋落物CO_2释放速率和土壤温湿度在不同处理下均具有明显季节差异性，湿季(4–9月)较高，旱季(10月–翌年3月)较低(图1：a、b和c)。重复测量方差分析表明，不同模拟酸雨处理间的凋落物CO_2释放速率具有显著的差异性($P<0.05$)，模拟酸雨抑制了凋落物CO_2释放速率。而对每次测定的结果进行方差分析表明，处理间的显著差异只出现在湿季(图1：c)，说明模拟酸雨对凋落物CO_2释放速率的抑制效应具有季节差异性。另外，根据每次测定的结果计算出凋落物CO_2释放的年通量(图2)，在CK样方为(1507.41±155.19) $gCO_2\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$，其中湿季占68.74%，旱季占31.26%。在年通量上，CK与T1处理没有显著差异，T2和T3处理却显著低于CK与T1处理；与CK相比，T2和T3处理下的CO_2年通量分别降低2.32%和42.72%。同样，模拟酸雨导致凋落物CO_2释放通量下降幅度也表现为湿季大于旱季，处理间的显著差异只出现在湿季。

各个处理的凋落物CO_2释放速率与土壤温度之间均呈显著指数回归关系($P<0.01$)，对应的方程可决系数为0.35–0.59，与土壤湿度之间均呈显著直线回归关系($P<0.01$)，对应的方程可决系数为0.25–0.45(图3，表1)。由各个模拟酸雨处理下凋落物CO_2释放速率与土壤温度之间的指数回归关系，可计算出CK、T1、T2 和T3处理的CO_2释放温度敏感系数Q_{10}值分别为2.14、2.18、1.86和1.77(图3，表1)，Q_{10}随酸处理pH值降低呈下降的趋势。



标记*者表示处理之间差异达到P=0.05显著水平

Values indicated by the asterisk show significant difference at P = 0.05 level

图1 不同处理间的土壤温度(a)、土壤湿度(b)和凋落物CO_2释放速率(c)

Fig. 1 Soil temperatures (a), soil moistures (b), and litter CO_2 emission (c) under different treatments

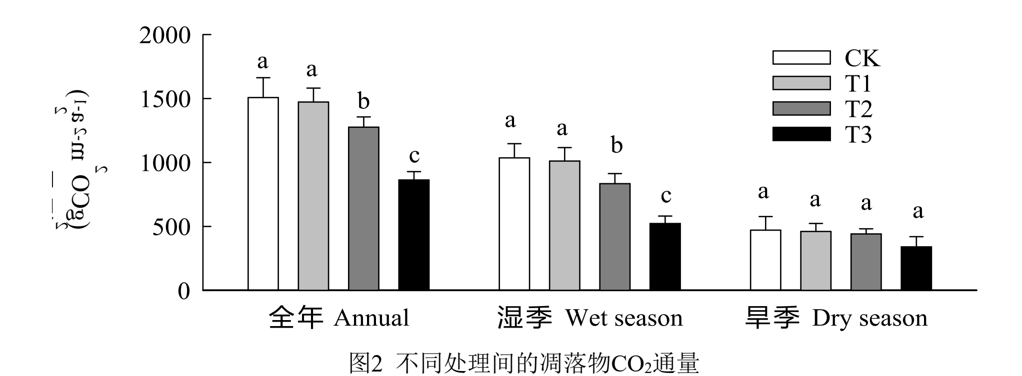


图2 不同处理间的凋落物CO_2通量

Fig.2 Litter CO_2 efflux under different treatments

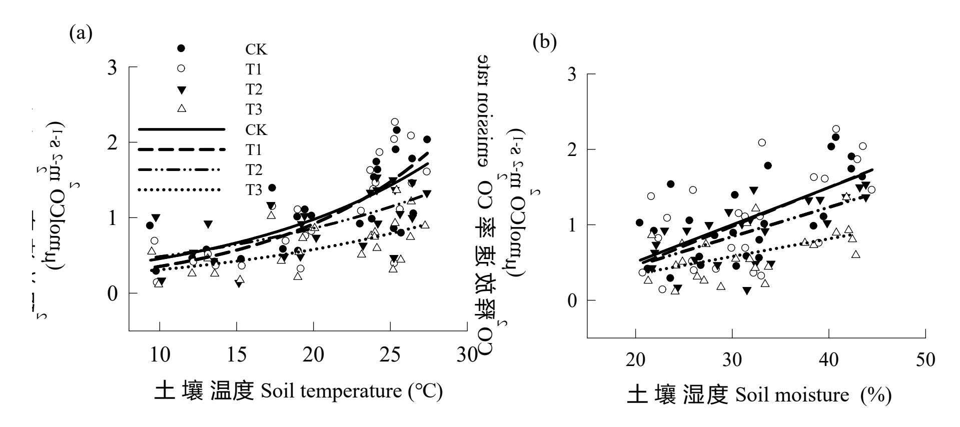


图3 不同处理下凋落物CO_2释放速率与土壤温度(a)和土壤湿度(b)的相关关系

Fig.3 Relationships between litter CO_2 emission rate and soil temperature (a), and that between litter CO_2 emission rate and soil moisture (b) under different treatments

表1 模型$R=(a)\exp^{(bT)}$和$R=aM+b$分别拟合凋落物CO_2释放速率与土壤温度和土壤湿度的关系。

Table 1 Model ($R=(a)\exp^{(bT)}$ and $R=aM+b$, respectively) for relationships between the litter CO_2 emission rate (R) and soil temperature (T) and soil moisture (M)

处理	$R=a\exp^{(bT)}$				$R=aM+b$		
Treatment	a	b	Q_{10}	R^2	a	b	R^2
CK	0.2137±0.0946	0.0760±0.0085 a	2.14	0.53	0.1115±0.0225	-0.4805±0.0494	0.41
T1	0.1970±0.0732	0.0781±0.0047 a	2.18	0.59	0.1061±0.0231	-0.5815±0.0519	0.37
T2	0.1731±0.0901	0.0622±0.0075 ab	1.86	0.38	0.0846±0.0169	-0.3242±0.0389	0.45
T3	0.1867±0.0827	0.0573±0.0064 b	1.77	0.35	0.0700±0.0384	-0.1231±0.0234	0.25

注：各个处理均为n = 24；R^2 为决定系数。

Note：n = 24 for all the treatments. R^2 is the determination of coefficient.

2.2 模拟酸雨下土壤pH值、微生物量碳和有机碳的动态及其与凋落物CO_2释放的关系

土壤 pH 值、土壤微生物量碳和土壤有机碳两次测定的平均值在 CK 样方分别为(3.77±0.10)、(360.26±40.68) mg·kg^{-1} 和(36.73±5.63) g·kg^{-1}(图 4：a、b 和 c)。方差分析表明，土壤 pH 值、土壤微生物量碳在 2011 年 6 月(模拟酸雨 3 个月后)均没有显著变化(P>0.05)。而在 2013 年 6 月(模拟酸雨 27 个月后)，上述两个指标在各处理间差异显著(P<0.05)，表现为：与 CK 处理相比，土壤 pH 值在 T2 和 T3 处理分别显著下降了 0.21 和 0.32，而土壤微生物量碳在 T2 和 T3 处理分别显著下降了 22.62%和 31.70%。同时，从两次测定结果的差异性也可看出，模拟酸雨下土壤 pH 值、土壤微生物量碳的下降趋势会随着处理时间的延长而逐渐显著。在两次测定中，模拟酸雨对土壤有机碳含量均没有显著影响(P>0.05)。

另外，对土壤 pH 值、微生物量碳、有机碳与凋落物 CO_2 释放通量数据的相关分析表明，土壤 pH 值、微生物量碳与凋落物 CO_2 释放通量两两之间均存在显著的正相关关系，但土壤有机碳与其他三个指标之间的相关关系不显著(表 2)。

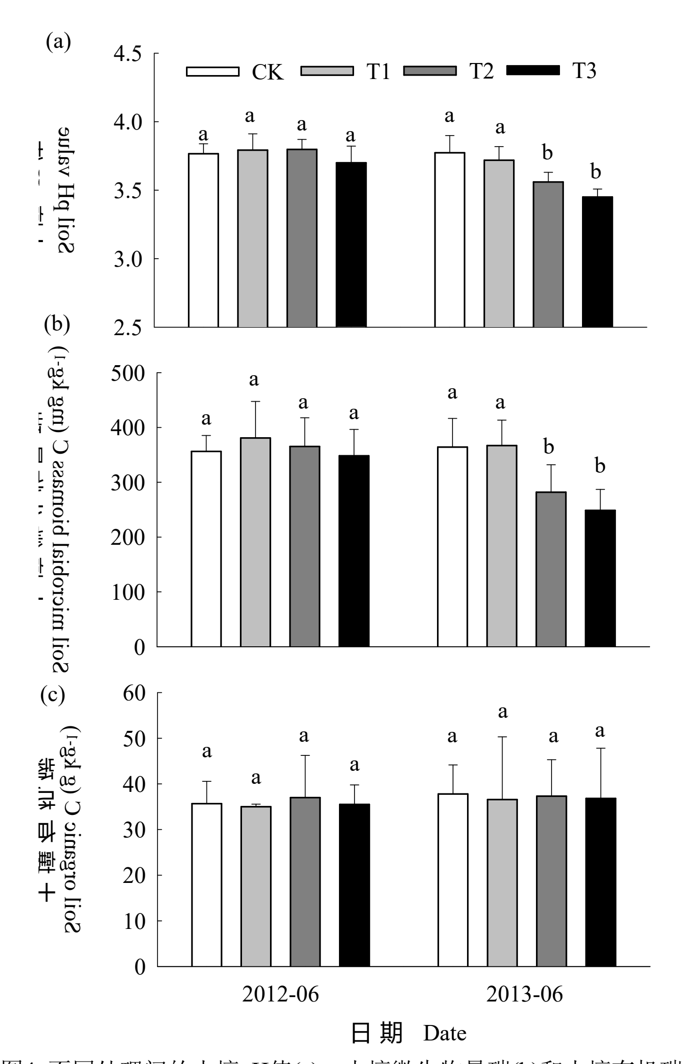


图4 不同处理间的土壤pH值(a)、土壤微生物量碳(b)和土壤有机碳(c)

Fig.4 Soil pH value (a), soil microbial biomass C (b), and soil organic C (b) under different treatments

表 2 土壤 pH 值、土壤微生物量碳、土壤有机碳与凋落物 CO_2 释放通量之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients among soil pH value, soil microbial biomass C, soil organic C, and annual litter CO_2 efflux

	土壤微生物量碳 Soil microbial biomass C	土壤有机碳 Soil organic C	凋落物 CO_2 释放通量 Annual litter CO_2 efflux
土壤 pH 值 soil pH value	0.875**	-0.169	0.669*
土壤微生物量碳 Soil microbial biomass C		0.157	0.906**
土壤有机碳 Soil organic C			0.103

* $P \le 0.05$；** $P \le 0.01$。

3 讨论与结论

森林凋落 CO_2 释放年通量与森林类型、立地条件和气候条件有关(李化山等，2014)。本

研究中混交林对照样方的凋落 CO_2 年通量为(1507.41±155.19) $gCO_2 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$(图 2)，这与邓琦等(2007)在鼎湖山混交林所得的结果相当(1471.2±50.0) $gCO_2 \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$，对土壤呼吸的年平均贡献量为 33.29%)，因此也接近全球范围内凋落物对森林生态系统中土壤呼吸的平均贡献率(33%) (Raich & Nadelhoffer，1989)，但高于陈光水等(2008)分析的国内 62 个森林样地凋落物对土壤呼吸的平均贡献率(20.2%)，同时低于热带山地云雾林的测定数值(37%)(Zimmermann et al，2009)。鼎湖山混交林凋落物 CO_2 释放年通量较大的原因，其一是该林型凋落物产量与存量大，另外与南亚热带气候湿热有利于凋落物分解有关(邓琦等，2007 年)。许多在亚热带和温度森林的研究结果，酸雨会显著延缓凋落叶的分解速率(Dangles et al，2004；洪江华等，2009；马元丹等，2010)，因此，这也是酸雨下森林土壤呼吸受到抑制的重要原因(Liang et a1，2013；Wu et a1，2015)。本研究创新之处在于原位量化了酸雨对混交林凋落物 CO_2 释放年通量的抑制程度(显著下降 15.35%-42.72%)。

模拟酸雨对混交林凋落物 CO_2 释放年通量的抑制作用与其胁迫下土壤酸化从而导致土壤微生物活性下降有关，表现为模拟酸雨下土壤 pH 值和土壤微生物量呈现显著的下降趋势。同时，凋落物 CO_2 释放年通量、土壤 pH 值和土壤微生物量碳三者之间呈现的显著正相关关系也佐证了这点。与许多热带和亚热带森林的结果类似(刘源月等，2010；谢小赞等，2009；Neuvonen & Suomela，1990)，本研究样地经过 27 个月的模拟酸雨处理后，土壤 pH 值显著降低；而值得注意的是本研究对照样地的土壤为强酸性土壤(pH 值小于 4)，这表明在模拟酸雨的影响下，原本酸化严重的土壤酸化加剧。一方面，凋落物分解释放 CO_2 的过程要依靠专性微生物的活动，而土壤酸化过程中逐渐累积的 H^+对土壤微生物具有毒害作用，从而改变了凋落物分解者的种类，结构以及活性(Falappi et a1，1994)。另一方面，酸雨处理会导致分解酶活性降低，凋落叶分解速率随之下降。如季晓燕等(2013)的研究表明，对凋落叶的分解贡献较大的脲酶和纤维素酶在酸雨胁迫下表现为一定的抑制作用。虽然本研究没有对土壤酶进行测定，但模拟酸雨降低了土壤微生物量碳，意味着土壤微生物活性在酸雨作用下受到抑制，以此抑制了凋落物分解释放 CO_2。

在热带和亚热带的森林，土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度的关系一般分别用指数回归方程和直线回归方程来描述(梁国华等，2016b)。凋落物CO_2释放是土壤呼吸的重要组成，因此，本研究不同处理下的凋落物CO_2释放速率均与土壤温度和土壤湿度分别呈显著的指数回归关系和显著的直线回归关系。而模拟酸雨对凋落物CO_2释放的抑制效应主要出现在湿季，这是由于鼎湖山地区湿季水热充沛，微生物活性较高，因此酸雨在湿季对其抑制作用也会更明显(Yang et al，2004)。另外，Q_{10}值是衡量土壤呼吸对温度变化响应敏感程度的一个重要指数(Ohashi et al，2000)，本研究与以往土壤呼吸研究 (Liang et a1，2013)一致，在模拟酸雨作用下Q_{10}呈现下降的趋势，表明模拟酸雨降低了凋落物CO_2释放温度敏感性，其原因可能与酸雨作用下土壤微生物和酶活性的改变有关(谢小赞等，2009)。

凋落物层和土壤在短期内对酸雨具有一定的缓冲能力(张德强等，2000)，但当大量H^+输入土壤生态系统而超过荷载时，土壤酸化就不可避免会发生(季晓燕等，2013)。因此，在本研究的初期，模拟酸雨没有显著降低土壤pH值，而随着处理的时间延长这种下降效应才变得显著，表明了模拟酸雨下森林的土壤酸化是个逐渐累积的过程(刘菊秀等，2003)。同时，土壤微生物活性及凋落物CO_2释放速率对模拟酸雨的响应也随着酸处理时间的延长而逐渐显著。另外，易志刚等(2006)研究结果表明，鼎湖山混交林0-15 cm土壤的碳储量为26.9 $t \cdot hm^{-2}$，而根据本研究的结果可折算，T2和T3处理下CO_2年通量分别降低0.63和1.76 $tC \cdot hm^{-2}$，分别相对于混交林0-15 cm土壤的碳储量的2.35%和6.53%，表明酸雨是影响鼎湖山混交林碳循环的一个重要因子。

总之，模拟酸雨抑制了鼎湖山混交林凋落物CO_2释放，这种抑制作用是由于酸雨处理下，土壤pH值和土壤微生物量碳下降，即土壤酸化导致土壤微生物活性下降所致。尽管如此，

本研究的土壤有机碳含量并没有在模拟酸雨下发生显著改变，这一方面表明，森林碳循环是个非常复杂的过程，受到许多其他因子的共同控制；另一方面也说明，酸雨对土壤生态系统的影响是个长期累积的过程，未来在继续探讨酸雨对凋落物CO_2释放的长期效应的同时，应加强酸雨对土壤有机碳及相关指标的变化进行长期和连续的监测分析，以使研究结果能够更好地说明酸雨对森林土壤碳循环产生的综合影响。

参考文献：

BUSCH G, LAMMEL G, BEESE FO, et al, 2001. Forest ecosystems and the changing patterns of nitrogen input and acid deposition today and in the future based on a scenario [J]. Environ Sci Pollut R, 8(2): 95–102.

CAO YZ, WANG SY, ZHANG G, et al, 2009. Chemical characteristics of wet precipitation at an urban site of Guangzhou, South China [J]. Atmos Res, 94(3): 462–469.

CHEN GS, YANG YS, LV PP, et al, 2008. Regional patterns of soil respiration in China's forests [J]. Acta Ecol Sin, 28(4): 1748–1761. [陈光水，杨玉盛，吕萍萍，等，2008. 中国森林土壤呼吸模式 [J]. 生态学报，2008，28(4)：1748–1761.]

CHEN YX, CHEN B, SUN H, et al, 2017. Impacts of warming and nitrogen addition on organic fraction release in fresh litter of *Larix potaninii* in alpine zone of the western Sichuan Province, China [J]. Chin J Appl Ecol, 28(6): 1753–1760. [陈玥希，陈蓓，孙辉，等，2017. 川西高海拔增温和加氮对红杉凋落物有机组分释放的影响 [J]. 应用生态学报，2017，28(6)：1753–1760.]

DANGLES O, GESSNER MO, GUÉROLD F, et al, 2004. Impact of stream acidification on litter breakdown：implication for assessing ecosystem functioning [J]. Appl Ecol, 41: 365–378.

DENG Q, LIU SZ, LIU JX, et al, 2007. Contributions of lifter-fall to soil respiration and its affacting factors in southern subtropical forests of China [J]. Adv Earth Sci, 22(9): 976–986. [邓琦，刘世忠，刘菊秀，等，2007. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素 [J]. 地球科学进展，22(9)：976–986.]

FALAPPI D, FARINI A, RANALLI G, et al, 1994. Effects of simulated acid rain on some microbiological parameters of subacid soil [J]. Chemosphere, 28(6): 1087–1095.

FAN HB, LIU WF, YANG YL, et al, 2008. Decomposition of leaf litter of Chinese fir in response to increased nitrogen deposition [J]. J B For Univ, 30(2): 8–13. [樊后保， 刘文飞， 杨跃霖，等，2008. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应 [J]. 北京林业大学学报，30(2)：8–13.]

HONG JH, JIANG H, MA YD, et al, 2009. The influence of acid rain on the leaf litter decomposition of three dominant trees in the subtropical forests [J]. Acta Ecol Sin, 29: 5246–5250. [洪江华，江洪，马元丹，等，2009. 模拟酸雨对亚热带典型树种叶凋落物分解的影响 [J]. 生态学报，29(10)：5246–5251.]

HUANG ZF, FAN ZG, 1982. The climate of Dinghushan [J]. Trop Subtrop For Ecosyst, 1: 11–23. [黄展帆，范征广，1982. 鼎湖山的气候 [J]. 热带亚热带森林生态系统，1(1)：11–23.]

JI XY, JIANG H, HONG JH, et al, 2013. The influence of acid rain on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests [J]. Acta Sci Circum, 33(7): 2027–2035. [季晓燕，江洪，洪江华，等，2013. 模拟酸雨对亚热带三个树种凋落叶分解速率及分解酶活性的影响 [J]. 环境科学学报，33(7)：2027–2035.]

LI HS, WANG JS, ZHAO XH, et al, 2014. Effects of litter removal on soil respiration under simulated nitrogen deposition in a *Pinus tabuliformis* forest in Taiyue Mountain, China [J]. Chin J Ecol, 2014, 33(4): 857–866. [李化山，汪金松，赵秀海，等，2014. 模拟氮沉降下去除凋落物对太岳山油松林土壤呼吸的影响 [J]. 生态学杂志，33(4)：857–866.]

LIANG GH, LI RH, QIU QY et al, 2014. Response of leaf litter decomposition of two dominant trees to simulated acid rain in southern China [J]. Acta Ecol Sin, 34(20): 5728–5735. [梁国华，李荣华，丘清燕，等，2014. 南亚

热带两种优势树种叶凋落物分解对模拟酸雨的响应 [J]. 生态学报，34(20)：5728–5735.]
LIANG GH, LIU XZ, CHEN XM, et al, 2013. Response of soil respiration to acid rain in forests of different maturity in southern China [J]. PLoS ONE, 8(4): e62207. doi: 10.1371/ journal, pone. 0062207
LIANG GH, WU JP, XIONG X, et al, 2016a. Response of soil respiration to simulated acid rain in three successional subtropical forests in southern China [J]. Chin J Appl Ecol, 35(1): 125–134. [梁国华，吴建平，熊鑫，等，2016. 南亚热带不同演替阶段森林土壤呼吸对模拟酸雨的响应 [J]. 生态学杂志，35(1)：125–134.]
LIANG GH, WU JP, XIONG X, et al, 2016b. Effects of simulated acid rain on soil respiration in a monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan Nature Reserve [J]. Guihaia, 36(2): 145–153. [梁国华，吴建平，熊鑫，等，2016. 模拟酸雨对鼎湖山季风常绿阔叶林土壤呼吸的初期影响 [J]. 广西植物，36(2)：145–153.]
LIN B, LIU Q, WU Y, et al, 2002. Water holding capacity of moss and litter layers of subalpine coniferous plantations in western Sichuan, China [J]. Chin J Appl Environ Biol, 8(3): 234–238. [林波，刘庆，吴彦，等，2008. 川西亚高山人工针叶林枯枝落叶及苔藓层的持水性能 [J]. 应用与环境生物学报，8(3)：234–238.]
LIU JX, ZHOU GY, CHU GW, et al, 2003. Effects of soil acidity on the soil nutrients under Dinghushan monsoon evergreen broad–leaved forest [J]. Acta Pedol Sin，40: 763–767. [刘菊秀，周国逸，褚国伟，2003. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤酸度对土壤养分的影响 [J]. 土壤学报，40(5)：763–767.]
LIU YY, JIANG H, LI YH, et al, 2010. A Short–term effect of simulated acid rain on the soil respiration of the compound system of Chinese fir seedling-soil [J]. Acta Ecol Sin，30: 2010–2017. [刘源月，江洪，李雅红，等，2010. 模拟酸雨对杉木幼苗-土壤复合体系土壤呼吸的短期效应 [J]. 生态学报，30(8)：2010–2017.]
MA YD, JIANG H, YU SQ, et al, 2010. Effects of simulated acid rain on the decomposition of *Phyllostachys pubescens* [J]. Acta Sci Natur Univ Sunyatseni, 49: 95–99. [马元丹，江洪，余树全，等，2010. 模拟酸雨对毛竹凋落物分解的影响 [J]. 中山大学学报：自然科学版，49(2)：95–99.]
MO JM, Brown S, Peng SL, et al, 2003. Nitrogen availability in disturbed rehabilitated and mature forests of tropical China [J]. Forest Ecol Manag, 175: 573–583.
NEUVONEN S, SUOMELA J, 1990. The effect of simulated acid-rain on pine needle and birch leaf litter decomposition [J]. J Appl Ecol, 27(3)：857–872.
OHASHI M, GYOKUSEN K, SAITO A, 2000. Contribution of root respiration to total soil respiration in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) artificial forest [J]. Ecol Res, 15(3)：323-333.
RAICH JW, SCHLESINGER WH, 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus, 44(2): 81–99.
RAICH JW, NADELHOFFER KJ, 1989. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends [J]. Ecology, 70(5): 1346–1354.
SAYER EJ, POWERS JS, TANNER EVJ, et al, 2007. Increased litterfall in tropical forests bootsts the transfer of soil CO_2 to the atmosphere [J]. PLoS ONE, 2(12): e1299.
SOTTA ED, MEIR P, MALHI Y, et al, 2004. Soil CO_2 efflux in a tropical forest in the central Amazon [J]. Global Change Biol, 10(5): 601–617.
SUN ZG, LIU JS, YU JB, et al, 2008. Effects of Simulated Wetland Water Change on the Decomposition and Nitrogen Dynamics of *Calamagrostis angustifolia* Litter [J]. Environ Sci, 29(8): 2081–2093. [孙志高，刘景双，于君宝，等，2008. 模拟湿地水分变化对小叶章枯落物分解及氮动态的影响 [J]. 环境科学，29(8)：2081–2093.]
ULRICH EG, WALTER JH, 1992. Modeling cation amelioration of aluminum phytotoxicity [J]. Soil Sci Soc Am J, 56(1): 166–172.
VASCONCELOS SS, ZARIN DJ, CAPANU M, et al, 2004. Moisture and substrate availability constrainsoil trace gas fluxes in an eastern Amazonian regrowth forest [J]. Global Biogeochem Cy, 18(2), DOI: 10.1029/2003GB002210.
WANG GJ, TIAN DL, YAN WD, et al, 2009a. Impact of litter addition and exclusion on soil respiration in a

Liquidambar formosana forest and a nearby *Cinnamomum camphora* forest of central southern China [J]. Acta Ecol Sin, 29(2): 643–652. [王光军，田大伦，闫文德，等，2009. 去除和添加凋落物对枫香(*Liquidambar formosana*)和樟树(*Cinnamomum camphora*)林 [J]. 生态学报，29(2)：643–652.]

WANG GJ, TIAN DL, YAN WD, et al, 2009b. Effects of aboveground litter exclusion and addition on soil respiration in a *Cunninghamia lanceolata* plantation in China [J]. Chin J Plant Ecol, 33(4): 739-747. [王光军，田大伦，闫文德，等，2009. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响 [J]. 植物生态学报，33(4)：739–747.]

WANG WX, XU PJ, 2009. Research Progress in Precipitation Chemistry in China [J]. Prog Chem, 21(z1): 266–281. [王文兴，许鹏举，2009. 中国大气降水化学研究进展 [J]. 化学进展，21(z1)：266–281.]

WU JP, LIANG GH, HUI DF, et al, 2015. Prolonged acid rain facilitates soil organic carbon accumulation in a mature forest in Southern China [J]. Sci Total Environ, 544(s1): 94–102.

XIE XZ, JIANG H, YU SQ, et al, 2009. Effect of simulated acid rain on soil respiration of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. Acta Ecol Sin, 29: 5713–5720. [谢小赞，江洪，余树全，等，2009. 模拟酸雨胁迫对马尾松和杉木幼苗土壤呼吸的影响 [J]. 生态学报，29(10)：5713–5720.]

XIONG X, ZHANG HL, WU JP, et al, 2016. ^{13}C and ^{15}N isotopic signatures of plant–soil continuum along a successional gradient in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. Chin J Plant Ecol, 40: 533–542. [熊鑫，张慧玲，吴建平，等，2016. 鼎湖山森林演替序列植物–土壤碳氮同位素特征 [J]. 植物生态学报，40，533–542.]

YANG XH, NIE CR, MAI ZM, 2004. Effect of acid rain on the main microbial strains of peanut soil in South China [J]. J Peanut Sci, 33(2): 26–29.

YANG ZH, 2002. Acid rain in china and its countermeasures [J]. Environ Sci, 21(1)：25–26. [杨宗慧，2002. 我国酸雨状况和对策 [J]. 环境科学导刊，21(1)：25–26.]

YAO JN, LYU JH, YU WL, et al, 2018. Effects of nitrogen deposition and management intensity on stoichiometry of leaf litter in Moso bamboo forest [J]. Chin J Appl Ecol, 2018, 29(2): 467–473. [姚钧能，吕建华，俞卫良，等，2018. 氮沉降和经营强度对毛竹林凋落叶生态化学计量特征的影响 [J]. 应用生态学报，29(2)：467–473.]

YI ZG, YI WM, ZHOU LX, et al, 2006. Vertical distribution of soil organic carbon, soil microbial biomass and soil CO_2 concentration in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. J Ecol Environ, 15(3): 611–615. [易志刚，蚁伟民，丁明懋，等，2006. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳、微生物生物量碳和土壤CO2浓度垂直分布 [J]. 生态环境学报，15(3)：611–615.]

ZHANG DQ, YE WH, YU QF, et al, 2000. The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan [J]. Acta Ecol Sin, 20(6): 938–944. [张德强，叶万辉，余清发，等，2000. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究 [J]. 生态学报，20(6)：938–944.]

ZHU SJ, WANG XM, LONG XJ, et al, 2011. Characteristics of inorganic chemical components in rainfall of the Dinghu Mountain. Acta Sci Natur Univ Sunyatseni, 50(5): 135–141. [朱圣洁，王雪梅，龙晓娟，等，2011. 鼎湖山降水无机化学成分变化特征 [J]. 中山大学学报(自然科学版)，50(5)：135–141.]

ZIMMERMANN M, MEIR P, BIRD M, et al, 2009. Litter contribution to diurnal and annual soil respiration in a tropical montane cloud forest [J]. Soil Biol Biochem, 41(6): 1338–1340.

ZIMMERMANN S, BRAUN S, CONEDERA M, et al, 2002. Macronutrient inputs by opposed to atmospheric deposition into two constrasting chestnut forest stands in southern Switzerland [J]. Forest Ecol Manag, 161: 289–302.